

УДК 574.5:004.932

¹О.М. Безвесільна, д-р техн. наук, проф.²Т.О. Сльнікова, асист.³Ю.О. Подчашинський, канд. техн. наук, доц.

АВТОМАТИЗОВАНА ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСІВ ЕВТРОФІКАЦІЇ У ВОДОЙМАХ ГОСПОДАРСЬКО-ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

¹Національний технічний університет України "КПІ"^{2,3}Житомирський державний технологічний університет

Розглянуто можливості застосування комп'ютеризованих технологій для автоматизованої обробки вимірювальної інформації про розвиток водоростей (евтрофікацію) у водоймах господарсько-побутового призначення. Початковими даними для дослідження процесів евтрофікації є відеозображення проб води, які використовуються для визначення геометричних ознак, чисельності та біомаси водоростей. Для комп'ютеризованої обробки вимірювальної інформації запропоновано методи цифрової обробки відеозображень та математичний апарат штучних нейронних мереж.

The possibilities of application informational-computer technologies for automated handling of a measuring information about development of seaweed (eutrofication) in household reservoirs are considered. The input data's for a research of processes eutrofication are videoimages of tests of water, which are used for the definition of geometric characteristics, number and biomass of seaweed. For handling a measuring information the methods of digital handling videoimages and mathematical means of artificial neural networks are offered.

Постановка проблеми

Евтрофікація, тобто продукування органічної речовини у водному об'єкті під дією зовнішніх і внутрішньоводних факторів, – одна із серйозних екологічних проблем. Евтрофікації піддаються майже всі водні об'єкти, однак найбільше вона виявляється у водосховищах з обмеженою циркуляцією води. Евтрофікація водойм являє собою природний процес. Його розвиток оцінюється геологічним масштабом часу. Однак у результаті антропогенного надходження біогенних речовин у водні об'єкти відбувається різке прискорення евтрофікації [1]. Цей процес призводить до надмірного розвитку водоростей та подальшого забруднення водойм унаслідок їх відмирання.

Збільшення біомаси водоростей до 100 мг/дм³ супроводжується значним зменшенням виділення кисню водоростевими клітинами та зниженням його концентрації у воді. Це, у свою чергу, різко прискорює відмирання водоростей і надходження у воду органічних, зокрема отруйних речовин – продуктів розкладу.

Унаслідок відмирання водоростей якість води може настільки погіршитися, що стає непридатною для питного водозабезпечення. Крім того, деякі водорості надають воді неприємного привкусу та запаху [1]. Це ускладнює вирішення завдання стійкого та якісного водозабезпечення.

Отже, виникає потреба в контролі за станом водойм санітарно-побутового призначення та розроблення відповідних методик контролю за процесами евтрофікації.

Важливе й актуальне завдання натеper – подальший прогноз динаміки процесів евтрофікації водойм.

Питання вивчення та моделювання процесів сезонного розвитку водоростей у водоймах розглядаються в ряді наукових праць [2–4]. Основою таких досліджень є методики відбору проб води, їх обробки в лабораторії та розрахунку показників стану екосистеми водойми [5]. Ці методики орієнтовані на використання звичайного лабораторного мікроскопа, підрахунок кількості водоростей, визначення їх розмірів та подальший розрахунок потрібних показників. Методики мають ряд суттєвих недоліків, пов'язаних, насамперед, з використанням ручної праці для ряду операцій.

За допомогою вимірювання, дослідження та моделювання процесів, що характеризують розвиток біологічних об'єктів, можна контролювати кількість водоростей і їх біомасу, а також прогнозувати інтенсивність розвитку водоростей та загальний стан екосистеми водойм. Таким чином, вивчення і дослідження процесів евтрофікації є важливою складовою частиною контролю за станом екосистем водойм господарсько-побутового призначення.

Мета цієї роботи – використання методів цифрової обробки відеозображень та математичного апарату штучних нейронних мереж для дослідження процесів евтрофікації у водоймах господарсько-побутового призначення, а також розроблення відповідних алгоритмів оброблення вимірювальної інформації про ці процеси.

Характеристика форм тіла водоростей

Основний зміст вимірювальної інформації, яку можна отримати під час візуального дослідження проб вод з водойми, – геометричні характеристики водоростей та їх кількість. Цю інформацію надалі використовують для визначення видового складу водоростей, класифікуючи та розраховуючи їх біомасу, що є важливим для оцінки стану екосистеми водойм господарсько-побутового призначення. Тому розглянемо можливі геометричні форми тіла водоростей різних видів, що трапляються в пробах води.

За формою тіла водорості поділяють на такі основні типи [1]:

- амебоїдний (ризоподіальний);
- монадний (джгутиковий);
- гемімонадний (палмелоїдний);
- кокоїдний;
- нитчастий (трихальний);
- різнонитчастий (гетеротрихальний);
- псевдопаренхіматозний (псевдотканинний);
- тканинний (паренхіматозний);
- сифональний;
- сифонокладальний.

Амебоїдний тип характеризується непостійною формою тіла, що окреслене клітковими оболонками, і здатністю до руху подібного до амеби. До цього типу належать деякі представники динофітових, золотистих і жовто-зелених водоростей.

Монадний (джгутиковий) тип будови тіла притаманний одноклітинним і колоніальним організмам, які мають міцну кліткову оболонку і один або декілька джгутиків. З утворенням колоній окремі клітини монадної будови об'єднуються шляхом покриття слизом або розростання оболонки. Цей тип будови притаманний багатьом видам динофітових, евгленових, криптофітових, золотистих, жовто-зелених і зелених водоростей. Гемімонадну (палмелоїдну) структуру мають одноклітинні і колоніальні форми водоростей, які втратили джгутики і псевдоподії, а разом з ними і можливість активно пересуватися у вегетативному стані. Вони мають міцну оболонку і здатні прикріплюватися до поверхні твердих матеріалів. Така будова характерна для деяких зелених, жовто-зелених і золотистих водоростей.

Кокоїдну будову тіла мають одноклітинні і колоніальні форми, покриті міцною оболонкою, у яких немає джгутиків і псевдоподій. Водорості такої будови нерухливі у вегетативному стані, за винятком діатомових та десмідієвих. Така будова є характерною переважно для діатомових та жовтозелених, рідше для динофітових і криптофітових. Евгленових і синьо-зелених водоростей з такою формою тіла немає.

Нитчаста структура утворюється з багатьох клітин, з'єднаних у формі ниток, які можуть бути прямими і розгалуженими. Вона трапляється у вільноплаваючих та прикріплених водоростях, покритих слизом або без нього. Це одна з найбільш поширених форм серед водоростей різних систематичних груп: синьо-зелених, зелених, жовто-зелених, червоних (рідше у золотистих і динофітових).

Різнонитчаста структура є похідною від нитчастої. Вона виникла в результаті морфологічних перетворень та отримання шаровищами (тілами водоростей) можливості горизонтального поширення та прикріплення до твердих субстратів. Такі утворення здатні підніматися вертикально, виконуючи функцію вегетативного розмноження. Горизонтальне і вертикальне розгалуження характерне для багатьох видів синьо-зелених, золотистих і бурих водоростей.

Псевдопаренхіматозний тип будови характеризується утворенням крупних тіл в результаті розростання ниток розгалуженого різнонитчастого шаровища.

Значно менше водоростей з тканинною (паренхіматозною) структурою тіла. Вона виникає в результаті ділення клітин у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Такий тип будови характерний для бурих водоростей, наприклад, ламінарій. Рідше він відзначається у червоних водоростей.

Сифональна будова характеризується відсутністю всередині шаровищ кліткових перегородок і наявністю значної кількості ядер. Шаровище може розростатися на декілька десятків сантиметрів, утворюючи різної форми кустоподібні розгалуження або кульоподібні структури. Така форма тіла властива прісноводним зеленим і жовто-зеленим водоростям. Сифонокладальний тип будови характеризується складною структурою шаровища, що складається з первинно багатоядерних сегментів. Притаманний лише зеленим водоростям.

Наведені геометричні характеристики можна використовувати для класифікації водоростей за видовим складом.

Методики контролю та дослідження процесів евтрофікації

Опрацювання проб води з водоростями в лабораторії (камеральне опрацювання) складається з декількох етапів.

Перший етап – якісний аналіз проби, який дозволяє провести систематичну ідентифікацію водоростей на всіх рівнях систематичної ієрархії, відомої з гідробіології: “відділ – клас – порядок – родина – рід – вид”.

Кількісний аналіз (другий етап) починається з підрахування кількості біомаси кожного виду водоростей. Надалі підраховують загальну кількість біомаси водоростей кожного систематичного відділу.

У гідроекологічних дослідженнях для опрацювання проб використовують світлові мікроскопи різних марок.

Найбільше поширені мікроскопи марки МБИ, основна вимога до яких – це велике збільшення (порядку $100^x \dots 200^x$) [6].

Підрахунок кількості водоростей виконують за допомогою спеціальних лічильних камер. Якщо їх немає, водорості можна підраховувати на скляних пластинах (предметних склах), розграфлених для зручності й більшої точності підрахунку кількості водоростей на смуги та квадрати.

Основна вимога – це точне дозування об'єму проби, що наноситься на пластину. Для цього використовують спеціальні штемпель-піпетки, розраховані на фіксований об'єм, що становить зазвичай $0,1 \text{ см}^3$ [5].

Перед початком підрахунків пробу ретельно перемішують, наносять на дно камери, щільно прикривають покривним склом і поміщають під мікроскоп.

Фітопланктон розраховують у рахунковій камері Нажотта об'ємом $0,02 \text{ см}^3$ та кількістю смуг 40. Клітини в пробі розраховуються за формулою:

$$N = \frac{n b k}{V},$$

де N – кількість клітин фітопланктону в 1 см^3 води; n – кількість клітин, знайдених у рахунковій камері; b – об'єм концентрату, см^3 ; k – коефіцієнт камери з урахуванням кількості визначених смуг; V – об'єм проби, см^3 .

Кількість водоростей визначають розрахунковим методом, а біомасу – розрахунково-об'ємним. Неодмінною умовою для цього є наявність даних про кількість конкретного виду водоростей у пробі води та лінійні розміри клітин водоростей цього виду [1; 2].

Для вимірювань розмірів водоростей їх прирівнюють до певних геометричних тіл, що найбільше подібні до певної морфологічної форми: кулі, паралелепіпеда, циліндра, конуса тощо. Далі вимірюють потрібні параметри: радіус, діаметр, висоту, довжину тощо.

Розміри водоростевих клітин вимірюють за допомогою окуляр-мікрометра з вимірювальною лінійкою, що входить до комплекту засобів мікроскопа. Ціну поділок лінійки окуляр-мікрометра визначають за допомогою об'єкт-мікрометра (предметне скло з нанесеною на нього лінійкою, ціна кожної поділки – 10 мкм).

Для отримання репрезентативних даних необхідно виміряти лінійні розміри не менше як 30 водоростевих клітин одного виду й отримані дані опрацювати статистично.

Об'єм клітин визначають за відомими геометричними формулами на підставі отриманих лінійних розмірів конкретної водорості, подібної до певної геометричної фігури. Іноді користуються табличним методом за вже визначеними розмірами та відповідними їм об'ємами водоростевих клітин, що є в лабораторії, або опубліковані в літературі.

Відносну щільність (до води) прісноводних водоростей беруть за $1,00 \dots 1,05$.

Вирахувану біомасу водоростей кожного виду множать на їх кількість і наводять в одиницях виміру мг/дм^3 або г/м^3 [1; 2].

Якщо по вертикалі водойми було відібрано серію проб з інтервалом 1 м , то біомасу (г/м^2) знаходять як середню арифметичну величину. Для випадку, коли відстані по вертикалі неоднакові, то біомасу розраховують як середньозважену величину за формулою

$$B_{\Sigma} = B_1 l_1 + B_2 l_2 + \dots B_n l_n,$$

де B – біомаса водорості з певного горизонту, мг/дм^3 чи г/м^3 ; l – $1/2$ проміжку між горизонтами, де були відібрані проби водоростей, м .

Використання водоростей як біологічного індикатора, що характеризує сучасний стан водної екосистеми та зміни, зумовлені антропогенним впливом, можливе лише в разі отримання кількісних показників розвитку водоростевих угруповань, а результати камерального опрацювання відібраних проб дозволяють установити основні показники видового та кількісного різноманіття [3; 5]. Процес відбору проб, їх зберігання, ручна обробка, а також сам розрахунок геометричних параметрів біологічних об'єктів досить трудомісткий і потребує великих затрат часу. Використовуючи сучасне обладнання, можна отримати оцифроване відеозображення біологічних об'єктів, а автоматизувавши процес вивчення геометричних ознак водоростей, – визначити інтегральні показники процесів розвитку водоростей, установити їх вид і надалі проаналізувати стан екосистеми водойм.

Для того, щоб отримати якісне відеозображення певного біологічного об'єкта, необхідно використовувати цифровий фотоапарат або цифрову відеокамеру. Обробивши ці відеозображення, можна отримати вимірювальну інформацію про геометричні ознаки біологічних об'єктів і визначити показники розвитку водоростей певного типу у водоймах.

Саме ці показники і є початковими даними для побудови математичної моделі, яка дозволить прогнозувати розвиток водоростей та керувати цим процесом.

Тепер існують універсальні програми обробки відеозображень, отриманих за допомогою сучасних мікроскопів та відеокамер, але в них не враховані особливості завдань, що розглядаються. Тому потрібно визначити набір і параметри процедур обробки відеозображень, що дозволяють вимірювати геометричні ознаки водоростей у пробах води та визначити засоби об'єднання їх із процедурами розрахунку інтегрованих показників стану екосистеми водойми.

Застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень водоростей забезпечує автоматизацію процесу досліджень, розширює функціональні можливості та підвищує оперативність засобів вимірювання геометричних ознак біологічних об'єктів у пробах води. Зображення водоростей, отримані після фільтрації шумів та сегментації, класифікуються на основі їх геометричних ознак, які можна визначити за відеозображеннями. В результаті визначають належність кожного екземпляра водоростей до одного з видів та розраховують інтегральні показники стану екосистеми водойми.

Методика визначення показників розвитку водоростей на основі комп'ютеризованих технологій обробки вимірювальної інформації полягає в такому:

- відбір і підготовка проб води з водоростями з контрольних точок водойми;
- формування цифрового відеозображення за допомогою мікроскопа та пристрою формування відеозображень;
- введення відеозображень в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ;
- цифрова обробка відеозображень з метою вимірювання кількісних показників, геометричних ознак, об'єму і біомаси водоростей;
- розрахунок інтегральних показників розвитку водоростей;
- прогноз динаміки процесів евтрофікації у водоймі.

Обробка відеозображень містить:

- сегментацію відеозображень на об'єкти (водорості) і фон за методом кольорової сегментації або на основі застосування штучних нейронних мереж;
- видалення шумів і вилучення неоднорідностей об'єктів;
- видалення об'єктів, розташованих на межі відеозображення;
- заповнення порожнин в об'єктах, що виникли в результаті дії шумів на початкове відеозображення. Об'єкти можна вибирати як в автоматичному, так і в ручному режимі, коли оператор безпосередньо на екрані монітора вказує опорні точки об'єктів на відеозображенні.

Застосування штучних нейронних мереж для обробки вимірювальної інформації про процеси евтрофікації

Алгоритми оброблення вимірювальної інформації за допомогою математичного апарату штучних нейронних мереж [7; 8] можна застосовувати для вирішення таких завдань дослідження процесів евтрофікації:

- сегментації відеозображень водоростей;
 - класифікації водоростей за видовим складом на основі геометричних ознак;
 - прогнозування процесів евтрофікації і їх контролю.
- Найпоширеніший метод сегментації цифрових відеозображень – це сегментація за поріг яскравості. Для кольорових відеозображень сегментацію виконують шляхом перетворення кольорового відеозображення у півтонове або через визначення відстані між значеннями кольору дискретних точок у кольоровому просторі, наприклад, у просторі RGB або HSV [9; 10].

Застосування цих методів до відеозображень водоростей не завжди можливе через деякі особливості цих відеозображень. Наприклад, слід враховувати, що яскравість і колір водоростей можуть дещо змінюватися навіть у межах одного відеозображення, яскравість і колір водоростей досить часто мало відрізняються від яскравості та кольору фону. Тому пропонується сегментацію відеозображень водоростей виконувати застосуванням штучних нейронних мереж.

Для виділення об'єктів на відеозображенні використовують нейронну мережу на основі прошарку нейронів Кохонена (прошарку нейронів, що змагаються). Така нейронна мережа забезпечує виділення центрів кластерів для масиву початкових даних. У цьому разі кольорове відеозображення водоростей перетворюється з колориметричної системи RGB в HSV або Lab.

Далі на відеозображенні обирають характерний для цього відеозображення фрагмент, який використовують для навчання нейронної мережі. При цьому в кольоровому просторі HSV або Lab обробляється інформація про колір дискретних точок фрагмента відеозображення і визначаються центри кластерів, що відповідають кольору об'єктів (водоростей) і фону. Кількість кластерів визначають на етапі навчання нейронної мережі і узгоджують з видовими ознаками водоростей. Після закінчення етапу навчання нейронна мережа виконує сегментацію цифрових кольорових відеозображень водоростей.

Зображення водоростей, отримані після фільтрації шумів та сегментації, потрібно класифікувати, тобто визначити належність кожного екземпляра водорості до одного з видів, відомих з гідробіології.

Таку класифікацію можна виконати за ознаками об'єктів, які визначають за їх відеозображеннями. Відомо багато підходів до класифікації об'єктів за їх відеозображеннями [10], наприклад, методи на основі наборів деяких ознак або структурно-синтаксичні методи. Але найбільш перспективними слід вважати методи класифікації, на підставі штучних нейронних мереж [7]. Нейромережевий підхід особливо ефективний для класифікації, оскільки він поєднує у собі здатність комп'ютера обробляти числа і здатність мозку до узагальнення і розпізнавання. Базовим набором ознак для класифікації водоростей є геометричні ознаки, визначені за відеозображеннями. Ці ознаки заздалегідь визначаються для еталонних зображень водоростей певних видів і використовують для навчання нейронної мережі. Сформульованим вимогам відповідає набір геометричних ознак, що вимірюють безпосередньо за відеозображенням або розраховують на основі інших геометричних ознак:

– поперечні розміри w і h та площа S об'єкта (водорості);

– коефіцієнт опуклості:

$$k_c = S / S_c,$$

де S_c – опукла площа об'єкта (площа опуклого багатокутника, у який вписано об'єкт);

– коефіцієнт заповнення:

$$k_f = S / (w h);$$

– ексцентриситет еліпса, який має моменти й осі інерції такі самі, як і об'єкт.

Останні три ознаки також називають коефіцієнтами форми геометричних об'єктів.

Приклад порівняння геометричних ознак для водоростей трьох різних видів наведено в таблиці.

Порівняння значень геометричних ознак для різних видів водоростей

Коефіцієнт форми	Вид водоростей		
	Euglena proxima	Volvox globator	Ulotrix
Коефіцієнт опуклості	0,975	0,991	0,882
Коефіцієнт заповнення	0,739	0,763	0,218
Ексцентриситет	0,793	0,234	0,987

Euglena proxima має монадний тип будови тіла та шароподібну геометричну форму, *Volvox globator* – монадний тип будови тіла та еліпсоподібну геометричну форму, *Ulotrix* – нитчастий тип будови тіла та тонку витягнуту в довжину геометричну форму. На підставі отриманих даних зробимо висновок про те, що коефіцієнти форми можна використовувати для класифікації і визначення видового складу водоростей в пробах води.

Крім завдань класифікації, нейронну мережу можна використовувати для пошуку залежностей у даних, що описують динаміку процесів евтрофікації у водоймах господарсько-побутового призначення. Нейромережа здатна знайти складні сховані залежності в даних, що не виявляються стандартними статистичними методами.

У цьому разі важливі завдання прогнозування розвитку водоростей та визначення заходів, що сприяють поліпшенню якості питної води.

Висновки

1. Досліджено застосування комп'ютеризованих технологій для обробки вимірювальної інформації про розвиток водоростей (евтрофікацію) у водоймах господарсько-побутового призначення.
2. Розроблено методику визначення геометричних ознак водоростей за відеозображеннями проб води з водойм. На підставі цих результатів ідентифікують водорості за видовим складом та визначають показники, що характеризують стан екосистеми водойми. Для комп'ютеризованої обробки вимірювальної інформації пропонують методи цифрової обробки відеозображень та математичний апарат штучних нейронних мереж.
3. Результати обробки вимірювальної інформації про розвиток водоростей мають практичне значення та практичне застосування. Їх можна застосовувати для проведення деєвтрофікаційних заходів у водоймах господарсько-побутового призначення, а також для детоксикації води.

Література

1. Романенко В.Д. Основы гидроэкологии: Учеб. для вузов. – К.: Генеза, 2004. – 664 с.
2. Топачевский А.В., Масюк Н.П. Пресноводные водоросли Украинской ССР. – К.: Вища шк., 1981. – 333 с.
3. Хоружая Т.А. Методы оценки экологической опасности. – М.: Экспертное бюро, 1998. – 224 с.
4. Водоросли: Справ. / С.П. Васер, Н.В. Кондратьева, Н.П. Масюк и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 608 с.
5. Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем / За ред. В.І. Назаренко. – К., 2002. – 48 с.
6. Князев В.С., Кононова И.Б. Руководство к лабораторным занятиям по общей петрографии: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 128 с.
7. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия–Телеком, 2001. – 382 с.
8. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника. – М.: Мир, 1992. – 127 с.
9. Абрамлейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применение. – Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 300 с.
10. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / Под ред. А.Н. Писаревского, А.Ф. Чернявского. – Л.: Машиностроение, 1988. – 424 с.

Стаття надійшла до редакції 04.07.06.